

UDK 666.974.001.4

Primljeno 23. 1. 2004.

Betoni visoke čvrstoće - makedonska istraživanja

Golupka Nečevska-Cvetanovska

Ključne riječi

beton visoke čvrstoće,
istraživanja u Makedoniji,
čelik, eksperimentalna
ispitivanja,
čvrstoća,
deformabilnost

Key words

high strength concrete,
research in Macedonia,
steel, experimental
testing,
strength,
deformability

Mots clés

béton à haute résistance,
recherches en Macédoine,
acier, essais
expérimentaux,
résistance,
déformabilité

Ключевые слова

бетон высокой
прочности,
исследования в
Македонии, сталь,
экспериментальные
испытания,
прочность,
деформативность

Schlüsselworte

hochfester Beton,
Forschungen in
Makedonien,
Stahl, experimentale
Untersuchungen,
Festigkeit,
Verformbarkeit

G. Nečevska-Cvetanovska

Izvorni znanstveni rad

Betoni visoke čvrstoće – makedonska istraživanja

Opisana su istraživanja provedena u Makedoniji u okviru znanstveno-istraživačkih projekata. Uz teorijska istraživanja provedena su i eksperimentalna ispitivanja. Prikazani su rezultati istraživanja svojstava čvrstoće i deformabilnosti betona i čelika. Opisan je projekt i izvedba modela za provođenje eksperimenata. Istaknuta je važnost istraživanja za primjenu materijala visoke čvrstoće u seizmički aktivnim područjima. U zaključcima su navedeni glavni rezultati istraživanja.

G. Nečevska-Cvetanovska

Original scientific paper

High strength concrete - Macedonian research

Research work conducted in Macedonia in the scope of several research projects is described. Theoretical research activities have been backed by experimental testing. Results obtained by testing strength and deformability of concrete and steel are presented. The project and model development for experimental work are described. The significance of this research for the use of high strength materials in seismically active areas is emphasized. Principal results obtained during this research work are presented in conclusions

G. Nečevska-Cvetanovska

Ouvrage scientifique original

Béton à haute résistance - recherches macédoniennes

Les recherches conduites en Macédoine dans le cadre des projets de recherche sont décrites. Les recherches théoriques sont soutenues par les essais expérimentaux appropriés. Les résultats obtenus lors des essais de résistance et de déformabilité du béton et de l'acier sont présentés. Le projet et le développement du model pour travail expérimental sont décrits. L'importance de ces recherches pour l'usage des matériaux à haute résistance dans les zones caractérisées par une activité sismique considérable, est mise en relief. Les résultats principaux obtenus au cours de ces recherches sont présentés dans les conclusions

Г. Нечевска-Цветановска

Оригинальная научная работа

Бетоны высокой прочности – македонские исследования

В работе описаны исследования, проведённые в Македонии в рамках научно-исследовательских проектов. Наряду с теоретическими исследованиями проведены и экспериментальные испытания. Показаны результаты исследования свойств прочности и деформативности бетона и стали. Описан проект и выполнение модели для проведения экспериментов. Подчёркнута важность исследований по применению материалов высокой прочности в сейсмически активных районах. В заключениях приведены главные результаты исследований.

G. Nečevska-Cvetanovska

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Hochfester Beton - makedonische Forschungen

Beschrieben sind Forschungen die in Makedonien im Rahmen wissenschaftlicher Forschungsprojekte durchgeführt wurden. Neben theoretischen Forschungen wurden auch experimentale Untersuchungen durchgeführt. Dargestellt sind die Forschungsergebnisse über die Eigenschaften der Festigkeit und Verformbarkeit von Beton und Stahl. Man beschreibt das Projekt und die Ausführung des Modells für die Durchführung der Experimente. Hervorgehoben ist die Wichtigkeit der Forschungen für die Anwendung hochfester Baustoffe in seismisch aktiven Gebieten. Im Schluss sind die hauptsächlichen Forschungsergebnisse angeführt.

Autor: Prof. dr. sc. **Golupka Nečevska-Cvetanovska**, IZIS, Sveučilište sv. Ćirila i Metoda u Skoplju, Republika Makedonija

1 Uvod

Može se reći da je u tehnologiji betona visoke čvrstoće beton (BVČ) relativno novi materijal koji pruža velike mogućnosti. Izraz beton visoke čvrstoće do sada nije precizno definiran. Ta je definicija ovisna o vremenu i geografskom području na koje se odnosi pa se stalno mijenja usporedno s razvojem novih materijala i tehnologija lijevanja i njege betona.

Beton visoke čvrstoće danas se u mnogim zemljama sve češće rabi u izvođenju raznih tipova projekata i građevina (izvještaj ACI-jeva odbora [2]). Uspoređivanjem sa ostalim materijalima lako možemo uočiti tri najvažnije prednosti BVČ zbog kojih se taj materijal vrlo rado upotrebljava u visokogradnji: veća čvrstoća po jedinici troška, veća čvrstoća po jedinici težine i veća krutost po jedinici troška. BVČ se odlikuje visokim odnosom između čvrstoće i gustoće isto kao i brojnim prednostima što se tiče skupljanja, pužanja i trajnosti, i to naročito zbog niske poroznosti i ostalih povoljnih karakteristika. Zbog tako dobrih svojstava, BVČ predstavlja optimalan izbor u rješavanju brojnih problema koji se pojavljuju pri projektiranju i to kako sa aspekta cijene (gdje je odnos između BVČ i normalnog betona 3:1) i sa stajališta kvalitete rješenja (nosivost BVČ znatno je veća od nosivosti normalnog betona). Mnogi autori proveli su i provode istraživanja kojima je cilj definiranje optimalne recepture betona visoke čvrstoće.

U skladu s modernim svjetskim trendovima u području razvoja novih materijala, 1992. godine pokrenut je, uz financijsku potporu Ministarstva znanosti Republike Makedonije, znanstvenoistraživački projekt "Razvoj metodologije za izradu betona visoke čvrstoće" koji se provodi u suradnji s građevinskim poduzećima *Beton* iz Skoplja, *Ading* iz Skoplja te u suradnji s IZIS-om, također iz Skoplja [12]. Osnovni je cilj projekta definirati metodologiju za izradu betona visoke čvrstoće, pri čemu bi se trebalo koristiti materijalima iz domaćih izvora. U razdoblju između 1992. i 1996. obavljena su eksperimentalna istraživanja fizičkomehaničkih karakteristika svih komponenata betona. U toj je fazi razvijen beton tlačne

čvrstoće do najviše 100 MPa, s tim da su upotrijebljeni samo lokalni materijali (tj. materijali iz Republike Makedonije).

Druga faza projekta pokrenuta je u travnju 1998. [4]. U toj su fazi provedena eksperimentalna istraživanja s naglaskom na razvoj i izradu modela od armiranobetonskih elemenata (3 grede i 3 stupa). Modeli su napravljeni od BVČ i visokovrijednog čelika u mjerilu 1:1. Na njima je izvršena serija ispitivanja cikličnim režimom opterećivanja, a pritom je uporabljena oprema za kvazistatička ispitivanja. Modeli greda projektirani su kao fiksni štapovi s poprečnim presjekom veličine 25/40 cm i dužinom 229 cm. Varijabilni parametri bili su tlačna čvrstoća betona (MB60, MB80 i MB100) i granična čvrstoća uzdužne armature ($f_y = 400$ MPa i $f_y = 1275$ MPa). Modeli stupova projektirani su kao fiksni elementi presjeka 30/30 cm i dužine 208 cm. Gore spomenuti parametri također su varirani. Razina osne sile bila je konstantna, to jest 800 kN.

2 Svojstva čvrstoće i deformabilnosti materijala upotrijebljenih za modele

2.1 Svojstva čvrstoće i deformabilnosti betona

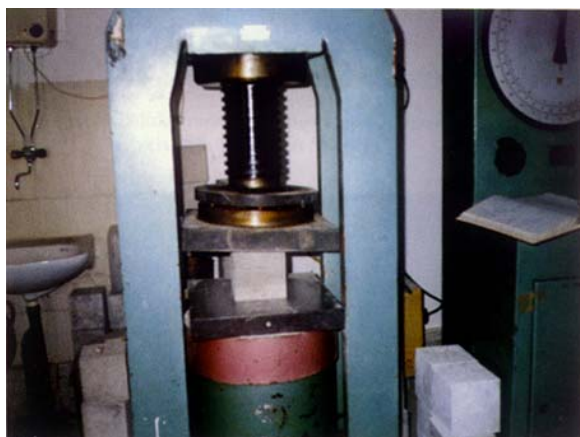
Laboratorijska ispitivanja nekih karakteristika agregata, cementa, vode i aditiva koja su se trebala obaviti u okviru kontrole kvalitete projektirane mješavine VBČ, izvršena su u laboratorijima građevinskih poduzeća *Ading* i *Beton* u razdoblju od 26. 10. 1999. do 4. 5. 2000. Analizirani su sljedeći parametri: konzistencija, vodocementni faktor, poroznost mješavine, gustoća svježeg betona te tlačna i vlačna čvrstoća.

Recepture za izradu betona MB60, MB80 i MB100 utvrđene su nakon analize rezultata dobivenih tijekom gore spomenutih laboratorijskih ispitivanja, nakon određivanja karakteristika sastojaka betona i nakon usvajanja postotka superplastifikatora koji je dodan da bi se poboljšala obradivost svježe betonske smjese. Parametri za projektiranje spomenutih klasa betona prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Parametri za projektiranje klasa betona MB60, MB80 i MB100

Sastojci betona	MB60	MB80	MB100
Agregat (kg/m^3)	1815	1800	1800
Cement -C (kg/m^3) Čisti portlandski cement, PC 45 _C , "Usje"	450	460	500
Voda pogodna za beton, W (l/m^3)	180	138	150
Vodocementni faktor, W/C	0.40	0.30	0.30
Aditivi, superplastifikator, SFL(kg/m^3)	0.0 (2% od C)	18.4 (4% od C)	17,5 (3,5% od C)
Silikatna prašina (kg/m^3)	/	36,8 (8% od C)	40,0 (8% od C)
Konzistencija svježe betonske mješavine (cm)	10-12	8-10	6-8

Da bi se omogućila potpuna kontrola projektiranog i ugrađenog betona, obavljena su laboratorijska ispitivanja betona uporabljena za izradu modela. Betoniranje modela obavljeno je u tri serije za tri različite klase betona. Za izvođenja modela uzet je i odgovarajući broj uzoraka betona. Na tim je uzorcima u laboratoriju ispitana tlačna i vlačna čvrstoća betona isto kao i modul elastičnosti ugrađenog betona. Rezultati laboratorijskih ispitivanja prikazani su na slici 1. i u tablici 2.



Slika 1. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona (MPa) i rezultati dobiveni tijekom ispitivanja

Tablica 2. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti za razne klase betona

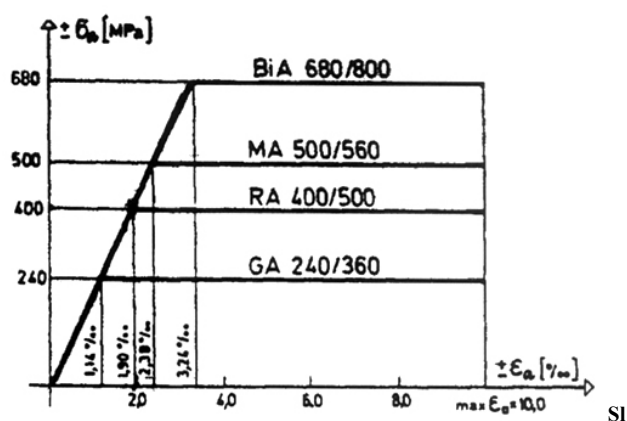
Klasa betona	Vlačna čvrstoća (MPa)	Modul elastičnosti (MPa)
MB60	7,62	31057
MB80	7,37	32216
MB100	9,12	33400

Tablica 3. Karakteristike materijala od kojih su napravljeni modeli grede

Uzorak	MB [MPa]	Uzdužna armatura			Poprečna armatura			
		klasa čelika	[cm ²]	[%]	klasa čelika	f_{yh} [MPa]	s [cm]	[%]
MGR60	60	RA 400/500	12,57	0,139	GA240/360	240	7,5	1,09
MGR80	80	SBPD 1275/1420	5,39	0,095	RA 400/500	400	7,5	1,29
MGR100	100	SBPD 1275/1420	5,39	0,076	RA 400/500	400	7,5	1,29

2.2 Svojstva čvrstoće i deformabilnosti čelika

Za armiranje modela grede MGR60 i modela stupa MS60 izrađenih od betona tlačne čvrstoće 60 MPa, ugrađena je rebrasta armatura RA400/500 [MPa] $\phi 16$ i $\phi 20$ kao uzdužna armatura, a obična armatura GA 240/360 [MPa] $\phi 8$ kao posmična armatura. Odnos σ - ϵ za te vrste armature prikazan je na slici 2.



Slika 2. Čvrstoća i deformabilnost ugrađene armature

Elementi greda i stupova izrađeni od betona klase MB80 i MB100 pojačani su armaturom ULBON, SBPD 1275/1420 [MPa] promjera 13 mm. Armaturu je proizvela japanska tvrtka NETUREN. Posmična armatura je čelik RA400/500 [MPa] promjera $\phi 8$.

2.3 Projektiranje i izvođenje modela za eksperimentalna ispitivanja

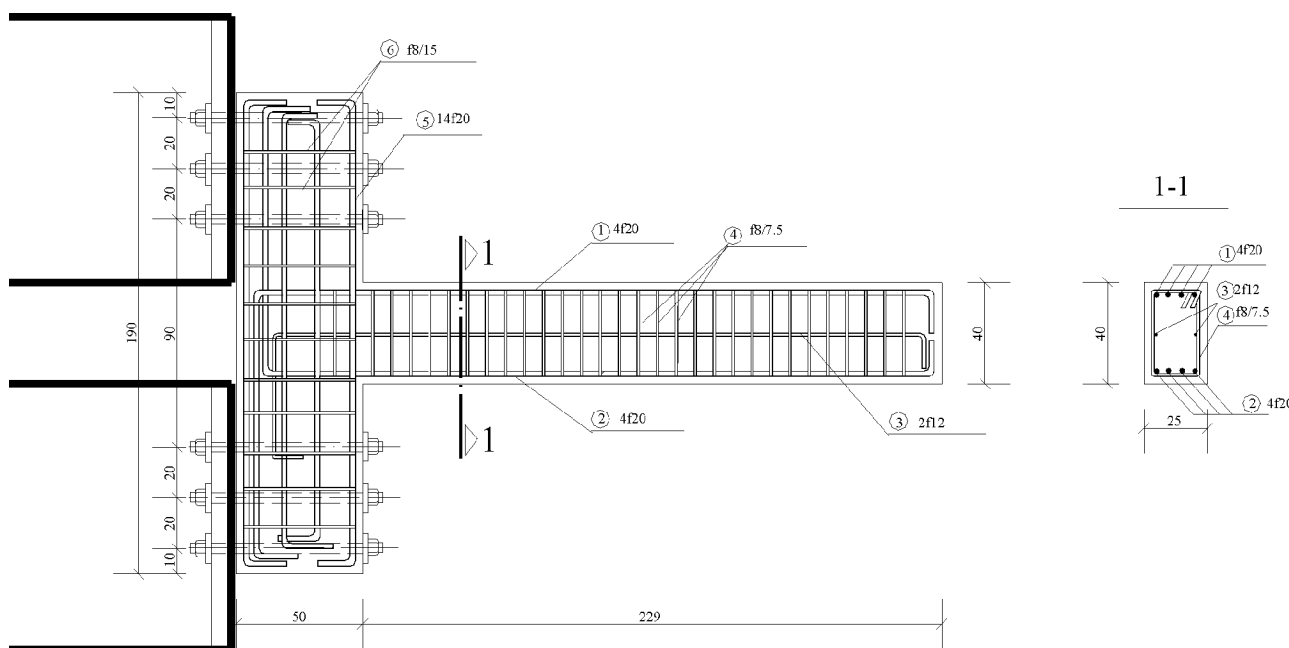
Da bi se definiralo ponašanje materijala visoke čvrstoće (betona i čelika) u nelinearnom području te razvila metodologija i kriteriji za primjenu tih materijala u seizmički aktivnim područjima [5] za ovaj je projekt definiran originalan program provedbe eksperimentalnih ispitivanja. Taj se program sastoji od eksperimentalnih istraživanja kojima je obuhvaćena serija od šest elemenata (grede i stupovi) pri čemu je osnovni cilj definiranje čvrstoće i deformabilnost elementa izrađenih od materijala visoke čvrstoće, a sve u funkciji nekoliko odabranih parametara koji su varirani u tijeku ispitivanja.

Geometrijske i materijalne karakteristike modela grede prikazane su u tablici 3., a modela stupa u tablici 4.

Tablica 4. Karakteristike materijala od kojih su napravljeni modeli stupa

Uzorak	MB [MPa]	P/Po	Uzdužna armatura			Poprečna armatura		
			klasa čelika	[cm ²]	[%]	klasa čelika	s [cm]	[%]
MS60	60	0,179	RA 400/500	6,03	0,078	GA 240/360	7,5	2,37
MS80	80	0,126	SBPD 1275/1420	4,04	0,083	RA 400/500	7,5	2,57
MS100	100	0,105	SBPD 1275/1420	4,04	0,066	RA 400/500	7,5	2,57

Prikaz armature modela grede i stupa dani su na slici 3.



Slika 3. Prikazi armature modela grede (gore) i stupa (dolje) (fotografije - laboratorij tvrtke Beton)

Betoniranje modela greda i stupova obavljeno je u laboratoriju tvrtke Beton u razdoblju od travnja do kraja svibnja 2000. godine. Modeli napravljeni od iste klase betona betonirani su istodobno. U tijeku izrade modela, za svaku su klasu betona uzimani kontrolni uzorci.

2.4 Eksperimentalna ispitivanja elemenata izrađenih od materijala visoke čvrstoće

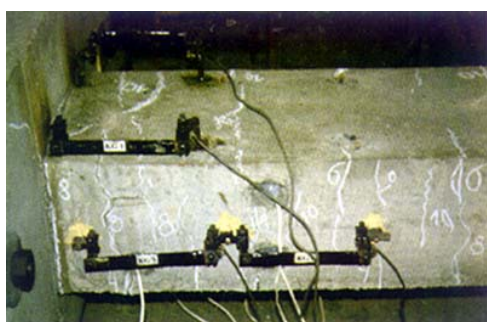
Eksperimentalna su ispitivanja obavljena u IZIIS-ovu laboratoriju za dinamička ispitivanja i to u kvazistatičkim uvjetima opterećivanja. Oprema za provedbu takvih ispitivanja sastoji se od uređaja za nanošenje sile tj. za

određivanje pomaka, instrumenta za mjerenje sile i deformacija, opreme za automatsku kontrolu ispitivanja i sustava za prikupljanje podataka.

Za eksperimentalno ispitivanje modela greda upotrijebljena su dva čelična nosača i jedan hidraulički pokretač od 500 kN. Tim se pokretačem ciklički nanosila horizontalna sila na slobodnom dijelu modela. Za eksperimentalno ispitivanje modela stupa uporabljen je jedan čelični nosač i dva hidraulička pokretača od 500 i 1000 kN - prvi pokretač od 500 kN za cikličko nanošenje horizontalne sile na slobodnom dijelu modela, a drugi od 1000 kN za nanošenje konstantne osne sile od 800 kN. Rasp-



Slika 4. Položaj modela grede i stupa i odgovarajuće opreme u toku kvazistatičkog ispitivanja (fotografirano u laboratoriju za dinamička ispitivanja IZIIS-a u Skoplju)



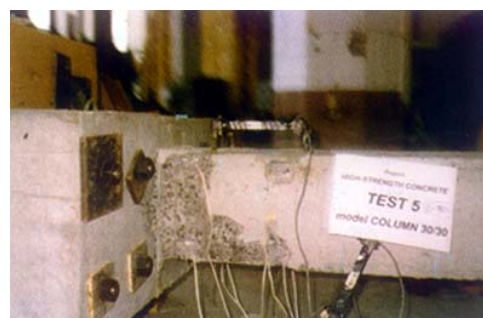
MGR 60 – TEST 1



MS 60 – TEST 4



MGR 80 – TEST 2



ME 80 – TEST 5



MGR 60 – TEST 3



MS 100 – TEST 6

Slika 5. Kvazistatička ispitivanja modela greda i stupova (fotografirano u laboratoriju za dinamička ispitivanja IZIIS-a u Skoplju)

ored modela grede i stupa i odgovarajuće opreme za kvazistatičko ispitivanje prikazan je na slici 4.

Instrumenti na modelima greda i stupova projektirani su i definirani za optimalno dobivanje svih potrebnih informacija o deformacijama i o ponašanju modela u raznim fazama opterećenja. Rabljene su dvije vrste instrumenata: unutarnji i vanjski. Unutarnji su instrumenti mjeri deformacija, a bili su raspoređeni po mjestima očekivana maksimalnog izduženja čelika. Za mjerenje ekspanzije betona i čelika, pomaka na slobodnom kraju modela i veličine horizontalne sile rabljeni su indikatori s obujmicom.

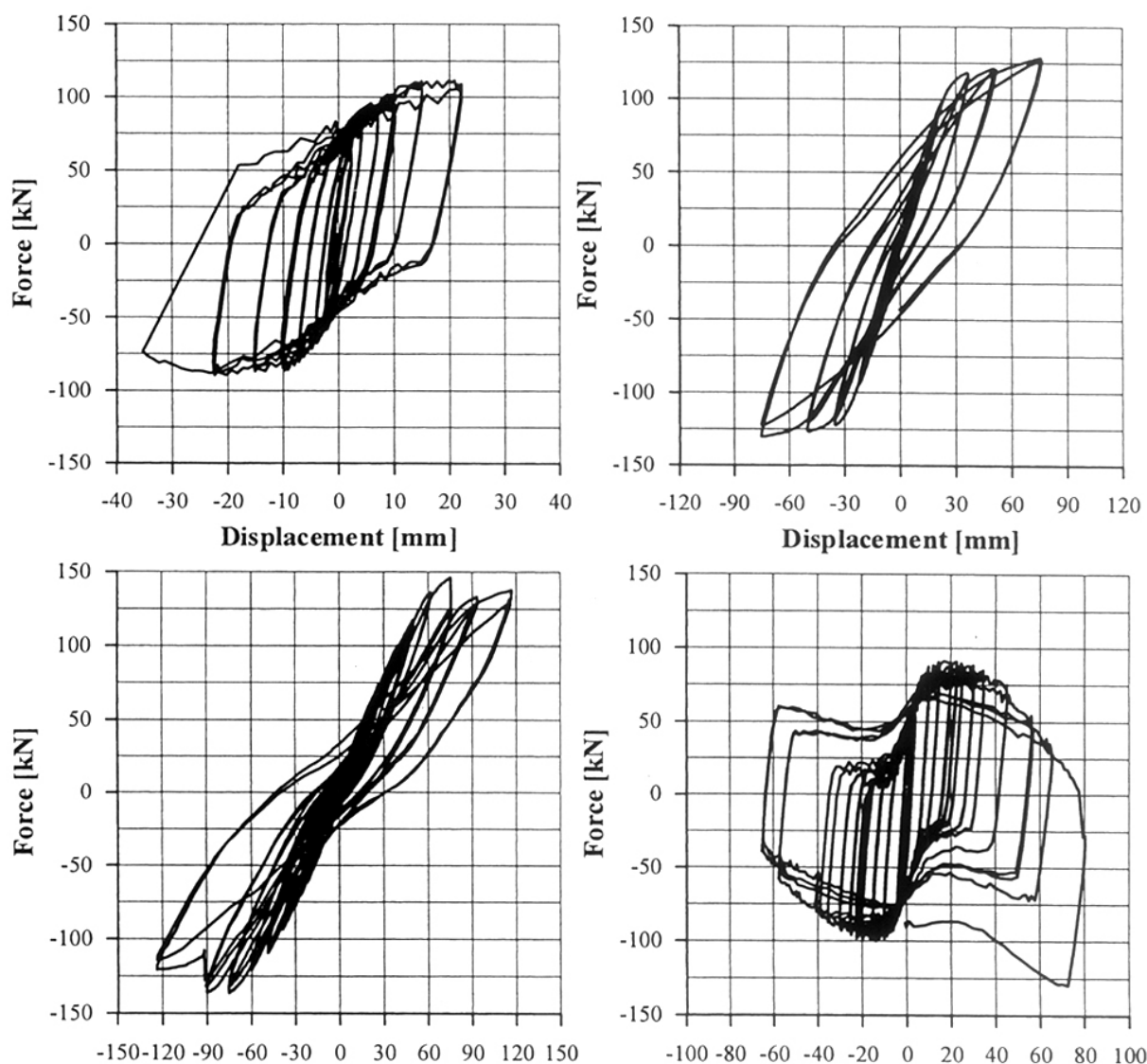
2.5 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

U nastavku su prikazani neki od rezultata dobiveni u tijeku eksperimentalnih ispitivanja. Rezultati dobiveni za

eksperimentalnih ispitivanja iskazani su rasporedom oštećenja na modelima greda i stupova (slika 5.) i histeretičkim odnosom između sila i pomaka koji su registrirani tijekom ispitivanja (slika 6.).

- Model grede MGR60-TEST1
- Model stupa MS60-TEST4
- Model grede MGR80-TEST2
- Model stupa MS80-TEST5
- Model grede MGR100-TEST3
- Model stupa MS100-TEST6
- MGR 60 - originalna registracija
- MS 60 - originalna registracija

Iz rezultata dobivenih na temelju eksperimentalnih ispitivanja jasno vidimo da pravilnim odabirom i raspoređivanjem armature dobivamo visokočvrste armirane grede i



Slika 6. Histeretički odnos između sile i pomaka

stupove koji se nakon izlaganja cikličnim opterećenjima ponašaju duktilno, tj. kod kojih se uočava dobra disipacija histeretične energije. Time je eliminiran osnovni nedostatak visokočvrstog betona (njegova krhkost).

3 Zaključci

- Beton visoke čvrstoće je složeni materijal sastavljen od agregata, cementa i vode koji je ujedno i poboljšan nekim drugim materijalima kao što su silikatna prašina, zgura, leteći pepeo i aditiv za smanjenje količine vode (plastifikator).
- U okviru znanstvenoistraživačkog projekta "Razvoj metodologije za izradu betona visoke čvrstoće" koji je financiralo Ministarstvo znanosti Republike Makedonije, te koji je proveden u suradnji sa skopskim tvrtkama *Beton*, *Ading* i *IZIIS* u vremenu od 1992. do 1996. godine, razvijena je metodologija za izradu visokočvrstog betona (do 100 MPa) isključivo od domaćih materijala (iz Republike Makedonije, a na bazi originalne tehnologije).
- U okviru znanstvenoistraživačkog projekta "Metodologija za dobiveni beton visoke čvrstoće i njezina primjena" koji je financiralo Ministarstvo znanosti Republike Makedonije, te koji je proveden u suradnji sa skopskim tvrtkama *Beton*, *Ading* i *IZIIS* u vremenu od 1998. do 2000. godine, obavljena su složena eksperimentalna i analitička ispitivanja modela elemenata izrađenih od materijala visoke čvrstoće.
- Modeli za eksperimentalna ispitivanja izrađeni su od betona visoke čvrstoće i visokovrijednog čelika u geometrijskom mjerilu 1:1. Na modelima je obavljena serija ispitivanja cikličkim opterećivanjem pomoću odgovarajuće kvazistatičke opreme. Sljedeći su parametri varirani u tijeku ispitivanja: tlačna čvrstoća betona, postotak armature i granična čvrstoća vertikalne i horizontalne armature.
- Sigurnost i ekonomična primjena betona visoke čvrstoće u seizmički aktivnim područjima ovisi o omjeru između tražene duktilnosti, površine i konfiguracije poprečne armature. Kada su stupovi u velikoj mjeri izloženi djelovanju osnih sila, treba predvidjeti prilično veliku količinu poprečne armature.

ZAHVALE

Autori se ovim putem zahvaljuju sljedećim institucijama na ustrajnoj podršci:

- Ministarstvu obrazovanja i znanosti Republike Makedonije
- Dioničarskom društvu *Ading*, Republika Makedonija
- Građevinskom poduzeću *Beton*, Skoplje, Republika Makedonija
- Institutu za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju, *IZIIS*, Sveučilište sv. Ćirila i Metoda, Skoplje, Republika Makedonija.

LITERATURA

- [1] Gavrilović, P.; Nečevska-Cvetanovska, G.; Petrusevska, R.: *Razvoj metodologije za beton visoke čvrstoće*, IZIIS-ov izvještaj 96-73 (na makedonskom jeziku).
- [2] ACI Committee 363. State of the Art Report on High Strength Concrete, 1997.
- [3] Danilovski D.; Nečevska-Cvetanovska, G.; Trenkovski, K.; Petrusevska, R.: *Seismic Resistance of High Strength R/C Members*, In: Proc. on the 12WCEE, New Zealand, February, 2000.
- [4] Nečevska-Cvetanovska, G.; Petrusevska, R. i dr.: *Metodologija za izradu visokočvrstog betona i njena primjena*, IZIIS-ov izvještaj 2001-20 (na makedonskom jeziku)
- [5] Apostolska-Petrusevska, R.: *Primjena visokočvrstog betona u projektiranju konstrukcija otpornih na seizmička djelovanja*, doktorska disertacija, IZIIS, 2003 (na makedonskom jeziku)